

Versuch 302

Elektrische Thermometer

1. Aufgaben:

- 1.1 Nehmen Sie die Kennlinien (U-T bzw. R-T) von Thermoelement, Thermistor und Widerstandsthermometer im Temperaturbereich 25...80 °C auf und stellen Sie die Meßwerte grafisch dar!
- 1.2 Bestimmen Sie die charakteristischen Merkmale (Empfindlichkeit, Temperaturkoeffizient u.ä.) für alle drei Meßfühler!
- 1.3 Zusatzaufgaben
 - a) für Mediziner: Bestimmen Sie die Zeit, die zur Messung der Temperatur Ihres Körpers (axillar) mit Hilfe eines digitalen Fieberthermometers minimal erforderlich ist. Messen Sie dazu die Abhängigkeit der Temperaturanzeige von der Zeit des (ununterbrochenen!) Wärmekontaktes mit dem Körper und stellen Sie diese grafisch dar!
 - b) für Physikstudenten und Interessierte: Bestimmen Sie im Thermistor die Größe der elektronischen Bandlücke des Halbleitermaterials.

2. Grundlagen:

Stichworte:

Temperaturmessung, elektrische Leitfähigkeit, thermoelektrischer Effekt, Energiebändermodell

2.1 Temperatur

Die Temperatur ist eine Zustandsgröße. Sie beschreibt den „Wärmezustand“ eines Körpers im thermodynamischen Gleichgewicht. Ihre Messung setzt die Definition einer Temperaturskala voraus.

Gesetzliche Temperatureinheit (SI-Einheit) ist das Kelvin (K). Ein Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von reinem Wasser. Die absolute Temperatur wird mit T bezeichnet. Die zugehörige Kelvin-Skala beginnt beim absoluten Nullpunkt $T = 0$ K. Bei Normaldruck (101,325 kPa) liegt der Gefrierpunkt des Wassers bei $T = 273,15$ K, der Siedepunkt bei 373,15 K. Neben der absoluten Temperatur gilt weiterhin die Celsius-Temperatur ϑ mit der Einheit Grad Celsius (°C):

$$\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T - T_0}{\text{K}}, \quad T_0 = 273,15 \text{ K}$$

Eine Temperaturdifferenz wird in K angegeben und ist in beiden Skalen gleich. Die Eichung von Temperaturmessgeräten erfolgt über Fixpunkte, insbesondere Schmelz- und Siedepunkte geeigneter Substanzen.

2.2 Temperaturmessung

Die Messung der Temperatur beruht auf der Temperaturabhängigkeit von Eigenschaften fester, flüssiger bzw. gasförmiger Stoffe [z.B. Volumenausdehnung, Druckänderung (in Gasen), Wärmestrahlung, Änderung elektrischer Eigenschaften].

Maßgebend dafür, welches Meßverfahren im konkreten Fall eingesetzt werden kann, sind der erfaßbare Temperaturbereich, das Zeitverhalten, die Genauigkeitsanforderung sowie die jeweiligen Meß- und Einsatzbedingungen.

Man kann zwischen berührungslosen (Strahlungs-) Meßfühlern (z.B. Pyrometer, Bolometer) und Berührungssensoren unterscheiden. Zu letzteren gehören neben Flüssigkeits- und Bimetallthermometern eine ganze Reihe elektrischer Temperatur-Sensoren, von denen Thermoelement, Widerstandsthermometer und Thermistor die gebräuchlichsten sind und daher im vorliegenden Experiment Verwendung finden.

2.3 Thermoelement

Das Thermoelement besteht im Prinzip aus zwei unterschiedlichen metallischen Drähten, die an den Enden miteinander verlötet oder verschweißt sind. Metalle enthalten freie Elektronen, wobei die Elektronendichte von der Metallart abhängt. Bringt man zwei unterschiedliche Metalle M_1 und M_2 in Kontakt, so entsteht wegen der Ladungsträgerdiffusion an der Kontaktstelle die Berührungs- oder Galvanispannung. Diese Spannung ist von der Temperatur abhängig. Wenn die Kontaktstellen I und II (Bild 1) verschiedene Temperaturen haben, dann ist die Differenz ΔU_G der Galvanispannungen infolge des Stromflusses meßbar. Man nennt ΔU_G die *Thermospannung* U und findet, daß sie proportional zur Temperaturdifferenz der beiden Kontaktstellen ist.

$$U = E \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Proportionalitätskonstante E hat die Dimension V/K und wird als Empfindlichkeit (Thermokraft) bezeichnet. Eine sehr hohe Empfindlichkeit besitzt z.B. die Kombination Silizium / Wismut ($E = 5,2 \cdot 10^{-4} V/K$).

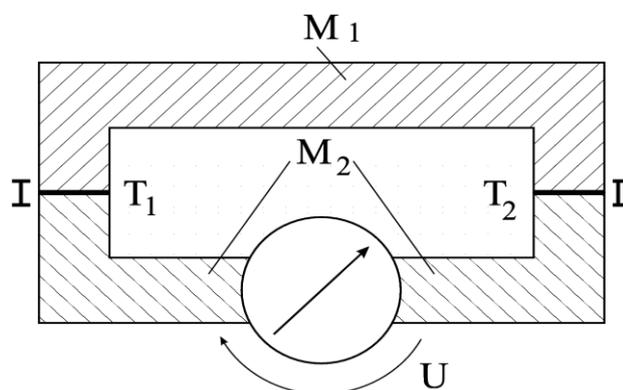


Bild 1: Thermoelement: I, II - Kontaktstellen mit den Temperaturen T_1 bzw. T_2 , U - Thermospannung

Von Interesse ist auch der nutzbare Temperaturbereich. Die Kombination Wolfram/Wolfram-molybdän eignet sich z. B. bis zu einer Temperatur von 3000 °C. Für technische Zwecke haben sich folgende Kombinationen bewährt.

Kombination	$E / \frac{V}{K}$
Eisen / Konstantan	$4,20 \times 10^{-5}$
Kupfer / Konstantan	$4,10 \times 10^{-5}$
Nickelchrom / Nickel	$3,30 \times 10^{-5}$
Platinrhodium / Platin	$0,65 \times 10^{-5}$

2.4 Widerstandsthermometer

In Metallen ist die Konzentration an freien Elektronen sehr groß. Der elektrische Widerstand ist im wesentlichen von der Wechselwirkung dieses „Elektronengases“ mit den Ionen im Kristallgitter des Metalls abhängig. Mit der Erhöhung der Temperatur vergrößert sich die Zahl der Stöße zwischen Elektronen und Ionen. Damit wird der Elektronenfluß gehemmt, d.h. der Elektrische Widerstand des metallischen Leiters nimmt zu. Das Geberelement eines Widerstandsthermometers besteht aus einer Metalldrahtwicklung auf einem isolierten Träger (z.B. Keramik) mit möglichst geringer Wärmekapazität und dem Normwiderstand R_1 bei der Bezugs- oder Umgebungstemperatur T_1 . Durch Wärmeaufnahme stellt sich bei der zu messenden Temperatur T_2 näherungsweise der Widerstand R_2 ein

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)] \quad (2)$$

Hier ist α der Temperaturkoeffizient des Widerstandsmaterials. Er liegt für Metalle bei etwa $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

2.5 Thermistoren

Thermistoren sind Halbleiterwiderstände aus thermisch gesinterten Materialien (Magnesium-Titan-Spinelle oder Magnesium-Nickel-Oxide), deren Widerstand mit steigender Temperatur kleiner wird (Heißleiter). Bei Halbleitern steigt mit zunehmender Temperatur die Konzentration der Ladungsträger signifikant. Dieser Effekt bestimmt im wesentlichen die Änderung der Leitfähigkeit. Der Widerstands-Temperatur-Verlauf des Thermistors kann in einem größeren Temperaturbereich mit der Beziehung

$$R = a \cdot e^{b/T} \quad (3)$$

beschrieben werden. Von allen Temperaturmeßfühlern hat der Thermistor in seinem Arbeitsbereich die größte Empfindlichkeit. Für kleine Temperaturbereiche besitzt er die größte relative Genauigkeit.

2.6 Vergleichsübersicht

Sachverhalt	Widerstands- thermometer	Thermoelement	Thermistor
Reproduzierbare Genauigkeit	0,02 ... 0,05 K	1 ... 7 K	0,1 ... 1 K
Stabilität	0,01 % Drift in 5 Jahren	1 K Drift pro Jahr	0,1 ... 2,5 K Drift im 1. Jahr
Empfindlichkeit	0,2 ... 10 Ω / K	10 ... 50 μ V / K	100...1000 Ω / K
Temperaturbereich	14 ... 900 K	100 ... 3000 K für verschiedene Materialien	1 ... 500 K für verschiedene Materialien
kleinste Abmessungen	\varnothing 3 mm Länge 20 mm	\varnothing 50 μ m	\varnothing 2 mm Länge 10 mm
Besonderheiten	Größte Genauigkeit in weitem Bereich, sehr stabil	Größter Temperaturbereich hohe Wirtschaftlichkeit	Größte Empfindlichkeit, geringe Eigenerwärmung

2.7 Kennlinie und Empfindlichkeit

Die Abhängigkeit der Meßgröße (Widerstand, Thermospannung) von der Temperatur bezeichnet man als Kennlinie des entsprechenden Temperaturmeßfühlers. Die Empfindlichkeit E ist die Änderung der Meßgröße pro Temperaturintervall, also

$$E = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{Thermistor, Widerstandsthermometer})$$

bzw.

$$E = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{Thermoelement}).$$

Das bedeutet: für eine gegebene Temperatur T_0 ist die Empfindlichkeit des Meßfühlers gleich dem Anstieg der Kennlinie bei $T = T_0$.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Messung

Die Sensoren sind in einer Halterung in einem wassergefüllten Thermostaten untergebracht, der elektrisch beheizt werden kann. Als Normal wird ein Quecksilberthermometer verwendet. Die Vergleichskontaktstelle des Thermoelements wird in Eiswasser in ein Dewar-Gefäß getaucht. Die Thermospannung am Thermoelement (TE) wird mit einem Digitalvoltmeter bestimmt. Für die Messung der Widerstände von Thermistor (TM) und Widerstandsthermometer (Pt 100) stehen zwei digitale Widerstandsmeßgeräte zur Verfügung. Nehmen Sie die Kennlinien der Sensoren in Intervallen von 5 ... 10 K auf. (Informationen zur Bedienung des Thermostaten finden Sie am Versuchsplatz.).

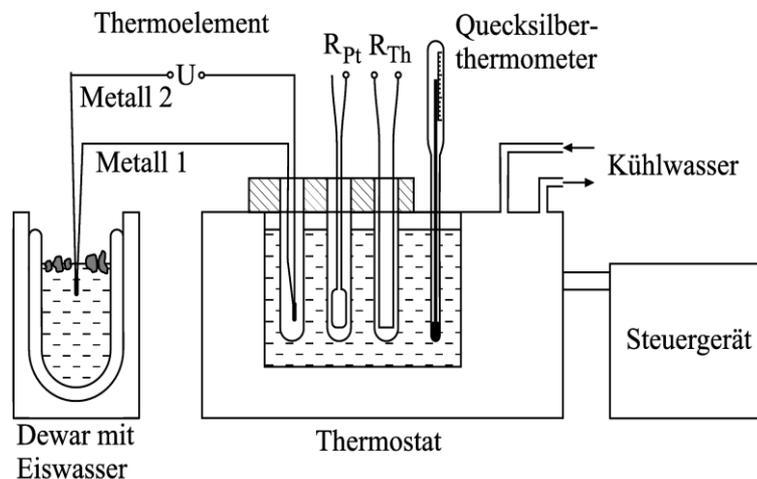


Bild 2: Experimentelle Anordnung

Beachten Sie, daß der Temperatúrausgleich zwischen Wasserbad und Meßfühler eine gewisse Zeit beansprucht (für jeden Meßpunkt Temperatur einige Minuten konstant halten)!

3.2 Hinweise zur Auswertung

- Ermitteln Sie durch lineare Regression (TE, Pt100) bzw. durch Anlegen von Tangenten (TM) die Empfindlichkeiten.
- Beträgt $U(0\text{ °C})$ beim TE tatsächlich 0 V?
- Ist $R(0\text{ °C})$ beim Pt100 gleich 100 Ω ? Wie lassen sich Abweichungen erklären?
- Bestimmen Sie (aus E und $R(0\text{ °C})$) den Temperaturkoeffizienten α des Pt100 (Vgl.- Wert für Platin: $3,9 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$).

- Bestimmen Sie die Konstanten a und b (lin Repr. von $\ln R$ über $1/T$), welche den Temperaturverlauf des TM beschreiben.
- Bei welchen Temperaturen gelten in etwa die in der Übersicht (2.6) angegebenen Werte für die Empfindlichkeit eines Thermistors?

3.3a (zu Aufgabe 1.3 a)

Bei der Messung der Körpertemperatur mit dem Fieberthermometer ist auf einen guten thermischen Kontakt zu achten. Die Meßzeitintervalle sind der Temperaturänderung anzupassen. Zu Beginn der Meßserie sollte alle 10 s abgelesen werden, wohingegen zum Ende eine Ablesung in Abständen von 30 s ausreichend ist. Führen Sie die Messung solange durch, bis sich die Temperatur nicht mehr ändert. Tragen Sie die gemessene Temperatur als Funktion der Zeit auf und bestimmen Sie daraus die minimale Meßzeit.

3.3 b (zu Aufgabe 1.3 b)

Bestimmen Sie aus der Konstanten b (Thermistor) die Größe der Bandlücke im Halbleiter. Nutzen Sie dazu den Zusammenhang: $b = \frac{\Delta E}{2k}$ (k...Boltzmannkonstante), wobei ΔE den Energieabstand zwischen Fermigrenze und Leitungsband bezeichnet. (Angabe ΔE in eV).